

JERZY B. ROGOWSKI

MARIUSZ FIGURSKI

Instytut Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej

Politechniki Warszawskiej

ZIEMSKIE SYSTEMY I UKŁADY ODNIESIENIA ORAZ ICH REALIZACJE

ZARYS TREŚCI: Ziemski system odniesienia stanowi podstawę do prowadzenia obserwacji nie tylko w geodezji, ale też w całej rodzinie nauk o Ziemi. Do roku 1988 powszechnie używanym ziemskim systemem odniesienia był umowny system odniesienia, którego podstawowa oś była określana poprzez zmienne w czasie współrzędne bieguna chwilowego, a położenie umownego południka zerowego określano jako odpowiadające południkowi zerowemu średniego obserwatorium sieci stacji Międzynarodowej Służby Czasu. Położenie bieguna chwilowego i czas niezbędny do określania długości geograficznej wyznaczane były technikami astrometrycznymi. W pracy przedstawiono historię wyznaczeń pozycji bieguna realizowanych przez służby ILS, IPMS i BIH. Od 1988 r. współrzędne bieguna „chwilowego” wyznaczane są z bardzo wysoką dokładnością razem ze współrzędnymi obserwatoriów i ich pochodnymi względem czasu poprzez obserwacje sztucznych satelitów Ziemi i techniką VLBI. W pracy omówiono problemy związane z aktualną realizacją ziemskich układów odniesienia i rolę służby IERS w ich tworzeniu i konserwacji. Przedstawiono również parametry transformacji kolejnych wersji układu ITRF od ITRF88 do ITRF2000 i ich znaczenie praktyczne. Omówiono modele NUVEL-1, NUVEL-1A oraz NNR-NUVEL-1A. Przedstawiono układ ETRF89 oraz stosowane w Polsce układy współrzędnych i ich relacje do układu ITRF i WGS84. Podano także przykłady transformacji pomiędzy układem ETRF i ITRF2000.

1. SŁUŻBY ILS, IPMS I BIH I ICH ROLA W TWORZENIU I KONSERWACJI ZIEMSKIEGO UKŁADU ODNIESIENIA

Rozwój naziemnych technik pomiarowych, pozwalających rozwijać sieci geodezyjne na dużych obszarach, spowodował konieczność zapewnienia równoległości osi układu współrzędnych astronomicznych do osi obrotu elipsoidy odniesienia. Równoległość ta jest spełniona dzięki stosowaniu równania Laplace'a (1) do redukcji azymutów na elipsoidę odniesienia (Heiskanen i Moritz 1966):

$$A - \alpha = (A - \lambda) \sin \varphi \quad (1)$$

gdzie: A i A – azymut i długość astronomiczna, α , φ i λ – odpowiednio azymut, szerokość i długość geodezyjna.

Problem skomplikował się po opracowaniu przez Eulera w 1758 r. modelu matematycznego przemieszczenia się osi obrotu względem bryły ziemskiej (tzw. nutacji swobodnej). W związku z tym powstała konieczność określania położenia chwilowej osi obrotu Ziemi względem umownego ziemskiego układu odniesienia oraz konieczność redukcji wyznaczanych współrzędnych astronomicznych i azymutów do tego układu. Ze względu na wiele czynników, które zaburzały ruch bieguna opisany przez model matematyczny Eulera, wynikała potrzeba wyznaczania współrzędnych chwilowego bieguna Ziemi w sposób obserwacyjny.

Biorąc powyższe pod uwagę, Międzynarodowa Asocjacja Geodezji (IAG) w 1899 r. powołała Międzynarodową Służbę Szerokości (International Latitude Service, ILS). Biegun, który został określony na podstawie obserwacji zmian szerokości astronomicznych z lat 1900–1905, wyznaczył kierunek osi podstawowej pierwszego umownego układu odniesienia, definiowany przez pozycje (średnie szerokości astronomiczne) pięciu stacji obserwacyjnych ILS: Carloforte (Włochy), Gaithersburg i Ukiah (USA), Kitab (Rosja), Mizusawa (Japonia), umieszczonych na równoleżniku $39^{\circ}08'$ (Mueller 1969).

Umowny południk zerowy został określony kilkanaście lat później. Wiązało się to z technicznymi możliwościami wyznaczania długości astronomicznej, wymagającej możliwości transferu czasu Greenwich. Do zrealizowania tego zadania powołano w 1912 r. Międzynarodowe Biuro Czasu (Bureau International de l'Heure, BIH). W tym okresie w zdecydowanej większości przypadków czas wyznaczano z obserwacji astronomicznych (Mueller 1969).

Ten pierwszy umowny ziemski układ odniesienia posiadał zasadniczą wadę. Określał on jedynie położenie osi układu, ale nie definiował jednoznacznie położenia początku układu. Układ ten był więc układem swobodnym i zapewniał jedynie równoległość osi umownych: kontynentalnych, regionalnych i lokalnych układów odniesienia do osi globalnego ziemskiego układu odniesienia.

Kolejnym etapem praktycznej realizacji ziemskich układów odniesienia technikami tradycyjnymi był układ odniesienia opracowany z obserwacji wykonanych w ramach, powołanej w 1962 r. Międzynarodowej Służby Ruchu Bieguna (**I**nternational **P**olar **M**otion **S**ervice, IPMS), stanowiącej rozwinięcie służby ILS poprzez włączenie do niej kilkudziesięciu obserwatoriów leżących na innych równoleżnikach.

Bardzo istotnym etapem rozwoju układów odniesienia realizowanych za pomocą technik tradycyjnych było przygotowanie przez BIH w 1968 r. metody łącznego opracowania obserwacji czasu i szerokości astronomicznej dla wyznaczania pozycji bieguna i czasu *UTI*. Tak opracowany układ odniesienia znany jest jako BIH68.

Stan taki trwał do początku lat sześćdziesiątych XX w. Po wyniesieniu na orbitę okołoziemską 4 października 1957 r. pierwszego sztucznego satelity Ziemi otworzyły się możliwości zastąpienia metod wyznaczania pozycji z pomiarów naziemnych (kątów, długości, różnic wysokości itp.) o zasięgu kontynentalnym metodami o zasięgu globalnym, wykorzystującymi pomiary pozycyjne i kinematyczne sztucznych satelitów Ziemi (początkowo kierunków, a później odległości i zmian odległości). Wprowadzenie przez BIH do opracowania pozycji bieguna i czasu *UTI* obserwacji dopplerowskich satelitów systemu nawigacyjnego TRANSIT zwiastowało zmierzch ery obserwacji astrometrycznych w definiowaniu systemów odniesienia i praktycznej realizacji układów odniesienia.

Postępujący rozwój satelitarnych technik pomiarowych stworzył nowe możliwości definiowania globalnych systemów odniesienia, co doprowadziło w 1966 r. do opracowania przez Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO), nowego, geocentrycznego układu odniesienia nazwanego Standard Earth III (Veis 1966). W wyniku tych prac w 1967 r. IUGG na Zgromadzenie Generalne w Lucernie, w porozumieniu z IAU wprowadziła nowy Geodezyjny System Odniesienia GRS67 (**G**eodetic **R**eference **S**ystem 1967). Decyzja o jego wprowadzeniu okazała się przedwczesna. Elipsoidę GRS67, o parametrach $a = 6\,378\,160$ m, $f = 1/298.25$ i układ odniesienia z nią związany wprowadzono tylko w Australii i części Ameryki Południowej.

2. LOKALNE I REGIONALNE UKŁADY ODNIESIENIA OPARTE NA KLASYCZNYCH TECHNIKACH POMIAROWYCH

Orientacja geodezyjnego układu odniesienia względem umownej (średniej) osi obrotu Ziemi oraz zerowego południka umownego zapewniona była poprzez stosowanie do redukcji azymutów równania Laplace'a (1) oraz parametrów ruchu obrotowego Ziemi (współrzędnych x_p, y_p bieguna chwilowego i czasu *UTI* podawanego w postaci różnicy $UTI - UTC$). Dla realizacji tak przyjętej orientacji konieczna jest znajomość składowej η odchylenia pionu w pierwszym wertykale. Obserwacje astronomiczne niezbędne do zastosowania równania Laplace'a w procesie orientacji elipsoidy odniesienia muszą być

zredukowane do ziemskiego bieguna umownego, do czego potrzebne są współrzędne x_p, y_p bieguna chwilowego.

Położenie środka elipsoidy odniesienia względem środka masy Ziemi wynika ze sposobu przyłożenia elipsoidy do geoidy. Rozróżnia się dwa sposoby przyłożenia elipsoidy:

- przyłożenie jednopunktowe ($\varphi = \Phi, \lambda = A, \alpha = A, N = 0$),
- przyłożenie wielopunktowe (elipsoida najlepiej dopasowana do obszaru) $\sum N^2 = \min$,
gdzie: Φ – szerokość astronomiczna, N – odstęp geoidy od elipsoidy odniesienia dla obszaru, na którym zakładana jest osnowa geodezyjna.

Oba z przedstawionych wyżej rozwiązań uniemożliwiają jednak określenie technikami tradycyjnymi wartości przesunięcia środka elipsoidy względem środka masy Ziemi. W tym czasie powstawały więc dla każdego kraju lub grupy krajów różne systemy odniesienia (lokalne lub regionalne), których zasięg wynikał z uwarunkowań geometrycznych i politycznych.

3. UTWORZENIE EUROPEJSKIEGO UKŁADU ODNIESIENIA ED50

Historia powstania jednolitego geodezyjnego układu odniesienia w Europie sięga okresu poprzedzającego II wojnę światową, kiedy to pojawiły się koncepcje wspólnego opracowania triangulacji kontynentalnej. Prace podjęto jednak dopiero po II wojnie światowej. Opracowano łącznie triangulacje krajów Europy Zachodniej. Koordynowała je powołana przez IAG Komisja RE-Trig (Commission for the **Re**-Adjustment of the **E**uropean **Tri**angulation). W wyniku opracowania powstał nowy, jednolity układ odniesienia dla Europy – ED50. W procesie opracowania zastosowano elipsoidę Hayforda 1924 z punktem przyłożenia w Poczdamie.

W ciągu następnych kilkunastu lat układ ED50 był udoskonalany i modernizowany. Służyły temu również kampanie satelitarnych obserwacji dopplerowskich WEDOC i WEDOC-2. Prace były kontynuowane do 1987 r. a ich celem było opracowanie nowego europejskiego układu odniesienia ED87. Prac tych nie zakończono, bowiem podczas XIX Zgromadzenia Generalnego Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (IUGG) w 1987 r. w Vancouver powołano w ramach Komisji X IAG nową permanentną Podkomisję EUREF (**E**uropean **R**eference **F**rame) zastępującą Komisję RETrig.

Zadaniem, jakie postawiono przed Podkomisją EUREF, było opracowanie nowego układu odniesienia dla Europy, z wykorzystaniem satelitarnych i kosmicznych technik pomiarowych, w tym GPS. Decyzja ta ostatecznie przyczyniła się do zaprzestania prac nad układem ED87.

4. SYSTEMY ODNIESIENIA WGS72, WGS84 I GRS80

Światowy System Odniesienia WGS72 (**World Geodetic System 1972**) był trzecim geocentrycznym układem odniesienia opracowanym przez US DMA (Agencję Kartograficzną Ministerstwa Obrony Stanów Zjednoczonych Ameryki Północnej); poprzednimi wersjami były: WGS60 i WGS66 (Kryński i Rogowski 2004). System ten był używany do 27 stycznia 1989 r. zarówno w dopplerowskim systemie TRANSIT, jak i w systemie GPS. Jego praktyczna realizacja w postaci układu odniesienia oparta była na sieci stacji śledzących systemu TRANSIT (TRANET). Udoskonalona wersja systemu WGS72 to obecnie wykorzystywany powszechnie WGS84 (**World Geodetic System 1984**) (DMA 1991).

Pierwotnie system odniesienia WGS84 był oparty na współrzędnych sieci stacji TRANET uzyskanych wyłącznie z pomiarów dopplerowskich satelitów systemu TRANSIT. Pozwoliło to na stworzenie globalnie jednorodnego układu odniesienia o dokładności rzędu 1–2 m, co wynikało z dokładności pomiarów wykonywanych techniką dopplerowską. Prędkości zmian współrzędnych stacji zostały pominięte jako zaniedbywalne wobec osiągniętych dokładności. Poprawę dokładności uzyskano po włączeniu do procesu poprawiania tego układu współrzędnych obserwacji wykonywanych techniką GPS. W procesie redefinicji i modernizacji systemu odniesienia WGS84 wykorzystano wyznaczenie techniką GPS współrzędnych 10 stacji śledzących, wchodzących w skład segmentu kontrolnego systemu GPS. Obserwacje na tych stacjach używane są również do wyznaczenia i predykcji efemeryd oraz poprawek zegarów satelitarnych. Informacje uzyskane tą drogą stanowią materiał wejściowy do przygotowania depeszy satelitarnej, która jest dostępna dla każdego odbiorcy sygnałów systemu GPS.

WGS84 jest światowym systemem odniesienia, wykorzystywanym głównie w geodezji i nawigacji, stworzonym i utrzymywanym przez Departament Obrony USA (DoD). Głównym jego zadaniem jest zapewnienie możliwości dokładnego określenia położenia punktów i nawigowania w skali całego globu ziemskiego przy użyciu satelitarnych technik pozycjonowania.

Kilkuletnie doświadczenia zebrane w czasie eksploatacji systemu GPS wykazały niedoskonałości systemu odniesienia WGS84, przede wszystkim jego niską dokładność w stosunku do współczesnych potrzeb geodezji, geodynamiki i geofizyki. Podjęto zatem decyzję o redefinicji WGS84. Współrzędne wspomnianych wcześniej 10 stacji śledzących zostały poprawione w procesie opracowania kilkutygodniowych obserwacji GPS z 22 stacji globalnej sieci **International GPS Service (IGS)**. Obserwacje te zostały wykorzystane zarówno do nowego wyznaczenia współrzędnych stacji, jak i do poprawienia orbit satelitarnych udostępnianych w efemerydach pokładowych GPS. Osiem spośród wybranych stacji IGS, które posiadały najbardziej stabilne

współrzędne w układzie *ITRF*¹, stanowiły nawiązanie pozostałej sieci (w sumie 32 stacji). W opracowaniu wyników pomiarów przyjęto standardy zgodne z zaleceniami IERS², co również wpłynęło na ostateczną jakość układu WGS84 (DMA 1991).

Wynikiem prac był nowy poprawiony system WGS84(G730); G730 oznacza epokę jego wprowadzenia, tj. 730 tydzień GPS. Moment ten jest początkiem wprowadzenia operacyjnie poprawionego systemu WGS84. Nowy układ charakteryzuje się dokładnością 10 cm w skali globalnej i dla określenia prędkości zmian współrzędnych stacji śledzących, podobnie jak układ *ITRF*, wykorzystuje model ruchu płyt tektonicznych NUVEL-1³. Od początku 1994 r. DMA (obecnie NIMA) wykorzystuje system WGS84(G730) do obliczania orbit satelitów GPS (efemeryd pokładowych). WGS84, podobnie jak układ *ITRF*, podlegał kolejnym redefinicjom (G873 i G1150) (EUROCONTROL 1995).

W okresie prowadzenia prac nad systemem WGS, XIV Zgromadzenie Generalne IUGG w grudniu 1979 r. w Canberze przyjęło rezolucję wprowadzającą nowy Geodezyjny System Odniesienia GRS80 (**Geodetic Reference System 1980**). Jego elementami były parametry geometryczne i fizyczne elipsoidy: $a = 6\,378\,137$ m, $GM = 3\,986\,005 \times 10^8$ m³s⁻², $J_2 = 108\,263 \times 10^{-8}$ oraz prędkość kątowna Ziemi $\omega = 7\,292\,115 \times 10^{-11}$ rad s⁻¹. System GRS80 zdefiniowano jako geocentryczny oraz przyjęto, że mała półoś elipsoidy odniesienia systemu będzie równoległa do osi *CIO* (Kryński i Rogowski 2004), a płaszczyzna południka zerowego będzie równoległa do południka zerowego Średniego Obserwatorium BIH.

5. SŁUŻBA IERS I JEJ ROLA W TWORZENIU I KONSERWACJI ZIEMSKICH UKŁADÓW ODNIESIENIA

Postępujący rozwój satelitarnych technik pomiarowych, początkowo fotograficznych, a następnie dopplerowskich i laserowych, skłonił do przeprowadzenia w 1980 r. krótkiej kampanii testowej MERIT (**M**onitoring of the **E**arth **R**otation and **I**ntercomparison of the **T**echniques), mającej na celu porównanie różnych technik pomiarowych w wyznaczaniu parametrów ruchu obrotowego Ziemi i konserwacji układów odniesienia (Melbourne i in. 1983). Uzyskane pozytywne wyniki kampanii testowej były podstawą do zorganizowania w latach 1983–1984 właściwej kampanii MERIT. Wyniki kampanii MERIT wykazały wyższość technik satelitarnych nad pomiarami astrometrycznymi i posłużyły do zdefiniowania nowego ziemskiego systemu odniesienia. Tym nowym systemem, wprowadzonym przez BIH w 1984 r. został ziemski system odniesienia BTS84 (**BIH Terrestrial System**), opracowany głównie na podstawie obserwacji VLBI, SLR i satelitarnych obserwacji dop-

¹ Układ *ITRF* omówiono w rozdziale 5.

² Zadania służby IERS omówiono w rozdziale 5.

³ Modele ruchu płyt tektonicznych omówiono w rozdziale 6.

plerowskich. Przy jego opracowaniu po raz pierwszy zastosowano model prędkości płyt tektonicznych AMO-2. Wyniki kampanii MERIT przesądziły o powołaniu nowej służby mającej za zadanie wyznaczanie parametrów ruchu obrotowego Ziemi i konserwację układów odniesienia. Została nią Międzynarodowa Służba Ruchu Obrotowego Ziemi IERS (**I**nternational **E**arth **R**otation **S**ervice) powołana w 1987 r. przez IUGG i Międzynarodową Unię Astronomiczną IAU. W wyniku tej decyzji w 1988 r. służba BIH została zastąpiona przez służbę IERS. Jednocześnie wprowadzono nowy układ odniesienia – *ITRF* (**I**nternational **T**errestrial **R**eference **F**rame), realizujący wprowadzony na mocy rezolucji IUGG w 1991 r. Międzynarodowy Ziemi System Odniesienia *ITRS* (**I**nternational **T**errestrial **R**eference **S**ystem).

ITRF powinien spełniać następujące wymagania, wymuszone przez dynamicznie rozwijające się globalne technologie pomiarowe (Hofmann-Wellenhof i in. 1997):

- układ geocentryczny o początku w środku mas Ziemi (łącznie z oceanami i atmosferą),
- orientacja osi zgodna z orientacją BIH dla epoki 1984 (BTS84) (Kryński i Rogowski 2004),
- model prędkości stacji nie posiada poprawek w odniesieniu do ruchów skorupy ziemskiej.

Układ *ITRF* jest układem kinematycznym, bowiem definiują go współrzędne stacji służby IERS, podane na określoną epokę i ich pochodne względem czasu. W 2003 r. służba IERS została przemianowana na Międzynarodową Służbę Ruchu Obrotowego Ziemi i Systemów Odniesienia (**I**nternational **E**arth **R**otation and Reference Systems **S**ervice), zachowując swój poprzedni akronim. Do zadań IERS należą (IERS 1996):

- definicja Międzynarodowego Niebieskiego Systemu Odniesienia *ICRS* i jego realizacja w postaci układu odniesienia *ICRF*,
- definicja Międzynarodowego Ziemi Systemu Odniesienia *ITRS* i jego realizacja w postaci układu odniesienia *ITRF*,
- wyznaczanie parametrów orientacji Ziemi (**E**arth **O**rientation **P**arameters, EOP) i ich zmian, wykorzystywanych do transformacji pomiędzy *ICRF* i *ITRF*,
- analiza danych geofizycznych do interpretacji zmian *ICRF*, *ITRF*, EOP i ich modelowanie,
- określenie standardów, stałych i modeli (konwencje).

IERS zrzesza następujące służby obserwacyjne dla różnych technik pomiarowych:

- Międzynarodową Służbę GPS/GLONASS (IGS),
- Międzynarodową Służbę Pomiarów Laserowych Odległości (ILRS),
- Międzynarodową Służbę VLBI (IVS),
- Międzynarodową Służbę DORIS (IDS).

6. PRĘDKOŚCI PŁYT TEKTONICZNYCH – MODEL NUVEL-1A

Absolutny ruch płyt tektonicznych można przedstawić, wykorzystując modele globalne. Jednym z nich jest model NUVEL-1, który uznany został za najdokładniejszy i od 1992 r. jest zalecany przez IERS. Do wyznaczenia wartości wektorów rotacji tego modelu użyto ponad tysiąc danych geofizycznych pochodzących z 22 granic płyt tektonicznych. Dały one znaczną poprawę modelu ruchu płyt względem poprzednich modeli (P071 i RM2). Zawierały one m.in. tempa rozrostu dna oceanicznego, azymuty uskoków transformujących oraz dane dotyczące trzęsień Ziemi (de Mets i in. 1990). Przewagą modelu NUVEL nad poprzednimi P071 i RM2 z 1978 r. jest wykorzystanie różnego rodzaju informacji geofizycznych i geodynamicznych (de Mets i in. 1990) odniesionych do średniego momentu czasu, w którym przypadało występowanie anomalii magnetycznej w warstwie 2A⁴ (Sandwell 2001).

Do konstrukcji globalnego modelu ruchu płyt tektonicznych wykorzystano dane z czterech źródeł:

- dane magnetyczne i batymetryczne, a w niektórych przypadkach także wyznaczone z danych altimetrycznych satelity Seasat pochodne wzdłuż śladu orbity satelity; na ich podstawie oszacowano prędkości wzajemnego rozchodzenia się płyt, przetransformowano azymuty uskoków oraz ich błędy; wektory przesunięć uskoków obliczono, wykorzystując dostępne dane dotyczące mechanizmów nacisku oraz oszacowano błędy tych wektorów;
- dane dotyczące ruchu płyty wzdłuż jej granicy; wyznaczono najlepiej dopasowane wartości wektorów prędkości kątowej, przeanalizowano wewnętrzną zgodność danych i porównano wyniki z wynikami wcześniejszych badań;
- z analizy warunków zamknięcia na obwodach płyt⁵ z danych opisujących ruch względny w punktach spotkania się trzech lub więcej płyt;
- z jednoczesnego przetworzenia danych pochodzących ze wszystkich płyt w celu wyznaczenia zbioru wektorów Eulera najlepiej pasujących w sensie najmniejszych kwadratów do danych; dodatkowym warun-

⁴ Warstwa 2A występuje bezpośrednio pod wstwą osadów oceanicznych wzdłuż grzbietów oceanicznych związanych z rozrostem dna oceanu. Warstwa ta charakteryzuje się występowaniem zwiększonej anomalii magnetycznej (Dadlez i Jaroszewski 1994).

⁵ Warunek zamknięcia oznacza, że suma wektorów Eulera lub wektorów prędkości kątowych opisujących względny ruch każdej pary płyt musi być równa zero (Gordon i in. 1987). Jest to standardowa metoda badania spójności danych opisujących ruch względny w punktach spotkania się trzech płyt.

kiem narzuconym w procesie wpasowania była zgodność z globalnym ruchem płyt tektonicznych.

Większość prędkości została wyznaczona bezpośrednio z analizy profili magnetycznych poprowadzonych w poprzek centrów grzbietów oceanicznych. Pozostałe wartości wyznaczono przez porównanie anomalii syntetycznych – obliczonych przy założeniu prędkości rozrostu 1 mm/rok – z anomaliami obliczonymi z obserwowanych profili magnetycznych. Porównanie to miało na celu znalezienie takiego profilu, dla którego różnica pomiędzy odległością centrum anomalii w warstwie 2A od centrum rozrostu dna oceanicznego wyznaczoną z obserwowanego profilu a odległością wyznaczoną z założonego modelu będzie minimalna. W latach dziewięćdziesiątych model NUVEL-1 został przeskalowany w wyniku udoskonalania metod pomiarowych i wyznaczenia nowej magnetycznej skali czasu (modele NUVEL-1A i NNR-NUVEL-1A). Model NUVEL-1A ma przyjętą jako nieruchomą płytę Pacyfiku, zaś NNR jest modelem uwolnionym od obrotu sieci w sensie Tisseranda⁶ (de Mets i in. 1994).

Tablica 1. Składowe wektorów rotacji dla modelu NUVEL-1 (de Mets i in. 1989)

Płyta	$\omega_{(x)}$ [°/10 ⁶ lat]	$\omega_{(y)}$ [°/10 ⁶ lat]	$\omega_{(z)}$ [°/10 ⁶ lat]
PCFC	-0.0907	0.2902	-0.5976
AFRC	0.0532	-0.1856	0.2348
ANTA	-0.0494	-0.1018	0.2218
ARAB	0.4003	-0.0311	0.4049
AUST	0.4695	0.3072	0.3762
CARB	-0.0109	-0.2027	0.0945
COCO	-0.6249	-1.2944	0.6544
EURA	-0.0590	-0.1434	0.1887
INDI	0.3995	0.0026	0.4066
NAZC	-0.0921	-0.5138	0.5756
NOAM	0.0152	-0.2155	-0.0094
SOAM	-0.0624	-0.0906	-0.0523
JUFU	0.2995	0.4805	-0.2936
PHIL	0.5913	-0.4412	-0.5976

⁶ To znaczy, że w wyniku sumarycznego ruchu płyt tektonicznych nie powstaje dodatkowy – wypadkowy moment pędu.

Do obliczenia składowych wektora prędkości płyty w punkcie stosuje się następujące wzory:

$$\begin{aligned} V_X &= \omega_{(x)}Z_0 - \omega_{(z)}Y_0 \\ V_Y &= \omega_{(z)}X_0 - \omega_{(x)}Z_0 \\ V_Z &= \omega_{(x)}Y_0 - \omega_{(y)}X_0 \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: X_0, Y_0, Z_0 – współrzędne punktu,
 $\omega_{(x)}, \omega_{(y)}, \omega_{(z)}$ – zestawione w tablicy 1 składowe wektorów rotacji dla poszczególnych płyt tektonicznych.

W rezultacie prac prowadzonych w DGFI w 1998 r. został opublikowany model APKIM (Drewes 1998). Powstał on w wyniku estymacji wektorów obrotu czasz sferycznych dla obszarów dających się modelować ruchem sztywnej płyty. Dla stref kontaktowych (takich jak Andy, strefa Morza Śródziemnego, Kalifornia i Wschodnia Azja) zastosowano estymację metodą elementów skończonych. Model ten jest modelem uwolnionym od obrotu sieci w sensie Tisseranda.

7. ITRF88 – ITRF2000, PRZEGLĄD PARAMETRÓW TRANSFORMACJI I ICH ZNACZENIE PRAKTYCZNE

Badania geodynamiczne i prace geodezyjne prowadzone w skali globalnej wymagają zdefiniowania jednolitego pod względem geometrycznym i fizycznym układu odniesienia. Rozwój technik i metod pomiarowych i wzrastająca ich dokładność pociąga za sobą konieczność zmiany w opisie zjawisk fizycznych; oba te czynniki prowadzą do powstania warunków do coraz dokładniejszych realizacji układów odniesienia. Odnosi się to w szczególności do kolejnych realizacji układu odniesienia – *ITRF*. W latach 1988–1994 *ITRF* ulegał corocznym modyfikacjom. Po 1994 r. zmiany te nie były tak regularne (tabl. 2). Bezpośredni wpływ na to miały dołączane nowe zbiory wykonywanych stale obserwacji i nowe techniki pomiarowe, a także stale zwiększająca się liczba globalnych stacji permanentnych GPS. Do stacji działających początkowo w ramach IGS dołączane były później sieci stacji regionalnych takich jak **EUREF Permanent Network (EPN)**. Konieczność wprowadzania nowych realizacji układu *ITRF* wynikała z wysokich wymagań dokładnościowych stawianych temu układowi, wynikających zarówno z potrzeb naukowych, jak i praktycznych.

Prędkości stacji w kolejnych realizacjach układu *ITRF* były wyznaczone z modelu NUVEL-1 bez uwzględnienia rotacji. Połączenie tego z nierównomiernym rozmieszczeniem stacji definiujących *ITRF* (zdecydowana ich większość rozmieszczona jest na obszarach kontynentalnych półkuli północnej) spowodowało rotację między wczesnymi wersjami układu *ITRF*, na po-

ziomie 0.2 mas/rok, która po akumulacji w 1992 r. wyniosła 1 mas (IERS 1993).

Tablica 2. Obowiązujące realizacje układu *ITRF* w ostatnim 10-leciu (dane zgodne z IERS)

Realizacja układu	Początek (tydzień GPS)	Koniec (tydzień GPS)
<i>ITRF92</i>	Jan 2, 1994 (730)	Dec 31, 1994 (781)
<i>ITRF93</i>	Jan 1, 1995 (782)	Jun 29, 1996 (859)
<i>ITRF94</i>	Jun 30, 1996 (860)	Feb 28, 1998 (946)
<i>ITRF96</i>	Mar 1, 1998 (947)	Jul 31, 1999 (1020)
<i>ITRF97</i>	Aug 1, 1999 (1021)	Dec 1, 2001 (1042)
<i>ITRF2000</i>	Dec 2, 2001 (1043)	-----

Analiza obserwacji VLBI, SLR i GPS z okresu poprzedzającego wprowadzenie układu *ITRF92* umożliwiła poprawienie wyznaczonych z modelu NUVEL-1 prędkości stacji. Wykazano jednocześnie, że wyznaczone z modelu prędkości nie zawierają efektów lokalnych, a dla pewnych punktów, w szczególności leżących w strefach aktywności sejsmicznej, są one niemożliwe do wyznaczenia. Ostatecznie do zdefiniowania układu *ITRF92* użyto obserwacji VLBI, SLR oraz GPS ze 150 stacji. Zastosowane na szeroką skalę obserwacje GPS oferują najefektywniejszą technikę zagęszczenia *ITRF* pod warunkiem, że są zintegrowane z siecią VLBI, która zachowuje absolutną orientację i skalę układu.

Z realizacją kolejnych wersji układu *ITRF* stowarzyszone są efemerydy satelitarne, które praktycznie go odtwarzają. W ostatnim 10-leciu układ *ITRF* był sześciokrotnie redefiniowany (tabl. 2). Redefinicji podlegały również współrzędne katalogowe stacji referencyjnych. Wynika z tego konieczność transformowania współrzędnych wyznaczonych w różnych realizacjach układu *ITRF*. Jest to szczególnie ważne w przypadku analizy ciągów zmian współrzędnych w czasie, odniesionych do różnych realizacji układu. Z praktycznego punktu widzenia należy transformować wszystkie współrzędne do układu „najmłodszego” (np. *ITRF2000*). Parametry transformacji pomiędzy kolejnymi wersjami układu *ITRF* wyznaczane są w oparciu o grupę stacji charakteryzujących się najbardziej stabilnymi wynikami opracowań oraz dysponującymi kilkoma technikami pomiarowymi (np. GPS, VLBI, SLR). Dla grupy tak wybranych stacji określa się siedem parametrów transformacji Helmerta i błędy średnie każdego z parametrów, które charakteryzują dokładność transformacji (Hofmann-Wellenhof i in. 1997):

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} s & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & s & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & s \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{Bmatrix} \quad (3)$$

gdzie: x, y, z – współrzędne wyznaczone,
 X, Y, Z – współrzędne w układzie *ITRF*,
 T_x, T_y, T_z – składowe wektora przesunięcia pomiędzy środkami układów,
 s – współczynnik zmiany skali,
 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – kąty obrotów wokół odpowiednich osi układu.

Tablica 3. Parametry transformacji Helmerta między układem *ITRF2000* a kolejnymi wcześniejszymi jego realizacjami (oficjalne parametry publikowane przez IERS)

Układ	T_x [cm]	T_y [cm]	T_z [cm]	s [ppb]	ω_x 0".001	ω_y 0".001	ω_z 0".001	Epoka
<i>ITRF97</i>	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997
<i>ITRF96</i>	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997
<i>ITRF94</i>	0.67	0.61	-1.85	1.55	0.00	0.00	0.00	1997
<i>ITRF93</i>	1.27	0.65	-2.09	1.95	-0.39	0.80	-1.14	1988
<i>ITRF92</i>	1.47	1.35	-1.39	0.75	0.00	0.00	-0.18	1988
<i>ITRF91</i>	2.67	2.75	-1.99	2.15	0.00	0.00	-0.18	1988
<i>ITRF90</i>	2.47	2.35	-3.59	2.45	0.00	0.0	-0.18	1988
<i>ITRF89</i>	2.97	4.75	-7.39	5.85	0.00	0.00	-0.18	1988
<i>ITRF88</i>	2.47	1.15	-9.79	8.95	0.10	0.00	-0.18	1988

Uzyskane w wyniku transformacji residua dla stacji definiujących układ odniesienia podlegają dokładnym analizom i jeżeli przekraczają założone kryteria wynikające z uzyskanych wartości błędów średnich, mogą kwalifikować stację do wyeliminowania spośród grupy stacji definiujących układ odniesienia. Jednak przed dokonaniem tak rygorystycznej operacji należy bardzo dokładnie zbadać wszystkie odchyłki i dokonać ewentualnych korekt współrzędnych, jeżeli otrzymane odchyłki są wynikiem skumulowanych błędów systematycznych. Z reguły ma to miejsce wówczas, gdy porównaniu poddawane są układy współrzędnych definiowane w oparciu o różne techniki pomiarowe. Tego typu poprawki w sposób naturalny podnoszą jakość każdego układu odniesienia i dzięki eliminacji błędów znacząco zwiększają jego

praktyczną wartość. Typowym przykładem takiej operacji jest układ WGS84(G730), który powstał w wyniku wprowadzenia poprawek do oryginalnej definicji układu WGS84, a powodem były wymagania dokładnościowe systemu GPS.

Przykłady parametrów transformacji pomiędzy kilkoma wybranymi układami odniesienia a układem *ITRF92* są podane w tablicy 4.

Tablica 4. Parametry transformacji Helmerta wybranych układów odniesienia do układu *ITRF92* (epoka 1988.0)

Układ odniesienia	T_x [cm]	T_y [cm]	T_z [cm]	s [ppm]	ω_x [mas]	ω_y [mas]	ω_z [mas]	RMS [cm]
NAD83	-94.0	198.0	54.0	-0.0050	27.5	15.5	10.7	2
WGS84	-6.0	52.0	22.0	0.0110	-18.4	-0.3	-7.0	<200
WGS84-GPS	-4.0	-1.0	-28.0	-0.2180	4.2	-4.0	-15.6	94
WGS730	0.0	-3.0	4.0	0.0000	-2.6	-2.5	-0.4	6
<i>ITRF93</i>	0.2	0.7	0.7	0.0012	-0.39	0.8	-0.96	<1

Dokładność ziemskich układów odniesienia w ostatniej dekadzie poprawiła się prawie o dwa rzędy wielkości. Efekt ten uzyskano dzięki zastosowaniu doskonalonych technik pomiarowych, takich jak VLBI, i technik geodezji satelitarnej.

8. *ETRF89* JAKO PODZBIÓR UKŁADU *ITRF89*

Na Zgromadzeniu Generalnym IUGG w Vancouver w 1987 r. powstała koncepcja nowego układu odniesienia dla kontynentu europejskiego. Z tej inicjatywy powołana została specjalna podkomisja EUREF, której powierzono opracowanie podstaw naukowych tego przedsięwzięcia. Jednocześnie organizacja Comité Européen des Responsables de la Cartographie Officielle (CERCO) zajęła się względami czysto praktycznymi w kontekście potrzeb geodezji i kartografii. Z jej inicjatywy zostały też podjęte decyzje, które pozwoliły wprowadzić projekt w fazę realizacji. Obydwie organizacje, pomimo problemów związanych z określeniem koncepcji i zadań przyszłej sieci kontynentalnej, dążyły do utworzenia Europejskiego Ziemskiego Systemu Odniesienia *ETRS* (**E**uropean **T**errestrial **R**eference **S**ystem) (Seeger 1993), zastępującego system ED50.

Obowiązujące wówczas ziemskie układy odniesienia z jednej strony nie gwarantowały zakładanej (geodezyjnej) dokładności pomiarów (układ WGS84), z drugiej strony adaptowanie układu *ITRF* na potrzeby praktyczne było trudne, bowiem występowały znaczące różnice pomiędzy pojawiającymi

się jego kolejnymi wersjami. Dla celów praktycznych stosuje się współrzędne elipsoidalne wykorzystujące elipsoidę GRS80, której wymiary nie odbiegają znacząco (mniej niż 1 cm) od wymiarów elipsoidy WGS84. Dla zapewnienia zgodności z układem *ITRF* do jego zdefiniowania wykorzystano sieć stacji SLR i VLBI leżących w Europie i wchodzących do realizacji układu *ITRF89*. W ten sposób układ **European Terrestrial Reference Frame** (*ETRF*) został precyzyjnie zdefiniowany i stał się podzbiorem układu *ITRF89*. Z uwagi na ciągły ruch płyt tektonicznych układ *ETRF* będzie zmieniał się w stosunku do układu *ITRF* z prędkością 1–3 cm/rok. Jednocześnie prawie nie ulega on deformacji wewnętrznej, poza lokalnymi ruchami tektonicznymi. W związku z tym można mu przypisać epokę początkową (referencyjną), a następnie wyznaczyć parametry transformacji w stosunku do układu *ITRF* lub WGS84.

Sieć punktów definiujących *ETRF* została zrealizowana z wykorzystaniem pomiarów GPS. W jej skład weszło kilkadziesiąt punktów, w tym również punkty fundamentalne. Pierwsza kampania obserwacyjna została przeprowadzona w maju 1989 r. z wykorzystaniem odbiorników GPS czterech różnych typów. Pomimo problemów wynikających z przyjęcia strategii wykorzystującej punkty fundamentalne, została ona wykorzystywana do realizacji *ETRF*. Na podstawie kampanii obserwacyjnych przeprowadzonych do 1989 r. dokonano wyboru 15 stacji, których współrzędne przyjęto jako stałe dla zdefiniowania układu **European Terrestrial Reference Frame 1989** (*ETRF89*). Każda z wybranych stacji była umieszczona na płycie Euro-Azjatyckiej; sieć składała się z 7 stacji VLBI i 8 stacji SLR; jako układ odniesienia przyjęto *ITRF89*; jako epokę odniesienia przyjęto 1 stycznia 1989 r. Układ otrzymał nazwę *ETRF89*, a definiujący go system **European Terrestrial Reference System 1989** (*ETRS89*). Układ *ETRF89* jest wykorzystywany obecnie przez zdecydowaną większość państw europejskich.

Od roku 1997 układ *ETRF89* jest realizowany przez sieć EPN (<http://www.epncb.oma.be>). Jako punkty nawiązania, od 1148 tygodnia GPS, wykorzystywane jest 12 stacji (BOR1, GRAZ, KOSG, MATE, ONSA, POTS, REYK, WTZR, VILL, GRAS, NYA1 i TRO1).

Układ *ETRF*, podobnie jak układ *ITRF*, jest układem kinematycznym. Jego realizacja i utrzymanie wymaga ciągłego monitorowania za pośrednictwem odpowiednio rozmieszczonych permanentnych stacji GPS tworzących sieć EPN. Dokładne określenie zmian w czasie współrzędnych stacji, wymaganych do nawiązania wykonanych w dowolnej epoce obserwacji GPS do obowiązującego układu *ETRF89*, możliwe jest jedynie wtedy, gdy odpowiednio blisko położone stacje permanentne prowadzą obserwacje w sposób ciągły. **Dopiero wieloletnie ciągi obserwacji z danej stacji, opracowywane wraz z obserwacjami innych stacji EPN, dostarczają dostatecznej informacji o zmienności współrzędnych stacji.** Odpowiednio rozmieszczone i sprawnie funkcjonujące stacje permanentne sieci EPN są niezbędne do wyrażenia w obowiązującym układzie *ETRF89* wyników obserwacji wykona-

nych w aktualnie używanej realizacji systemu globalnego *ITRS* (obecnie *ITRF2000*).

Współrzędne punktów wyznaczane są w układzie *ITRF* (w aktualnej jego realizacji), dlatego przejście do układu *ETRF89* zaleca się wykonać według następującego algorytmu (Boucher i Altamimi 2001):

Krok 1. Obliczenie współrzędnych wyrażonych w *ITRF* na epokę t_c

Operacja ta ma na celu przeliczenie współrzędnych katalogowych w układzie *ITRF* z epoki odniesienia t_0 na epokę obserwacji t_c z wykorzystaniem danych IERS. Współrzędne na epokę obserwacji przeliczane są przy użyciu wektorów prędkości stacji IGS, które były wykorzystane do transformacji sieci swobodnej do układu *ITRF*. Składowe prędkości V_{ITRF} można uzyskać z raportów IERS (*ITRF Velocity Field*). Do określenia wektorów prędkości stacji nieumieszczonych w katalogach używany jest model geofizyczny ruchu płyt tektonicznych NNR-NUVEL-1A. Drugi przypadek dotyczy punktów nowych lub tych, co do których istnieją wątpliwości dotyczące poprawności określenia prędkości. W konsekwencji nowe współrzędne na epokę obserwacji t_c wyznaczane są przy użyciu następującej formuły:

$$X_{ITRF}(t_c) = X_{ITRF}(t_0) + V_{ITRF}(t_c - t_0) \quad (4)$$

Uzyskane w ten sposób współrzędne przyjmowane są *a priori* do opracowania obserwacji satelitarnych GPS/GLONASS (Figurski 2002).

Krok 2. Transformacja współrzędnych wyrażonych w *ITRF* na epokę t_c do układu *ETRF89* na epokę t

Operacja wymaga wprowadzenia systematycznego przesunięcia układu *ITRF* względem *ETRF89*, ale bez zmiany skali układu *ITRF*. Tak sformułowane zadanie realizowane jest według następującej zależności:

$$\begin{Bmatrix} X_{ETRF89} \\ Y_{ETRF89} \\ Z_{ETRF89} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} X_{ITRF} \\ Y_{ITRF} \\ Z_{ITRF} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 & -\dot{\omega}_z & \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z & 0 & -\dot{\omega}_x \\ -\dot{\omega}_y & \dot{\omega}_x & 0 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} X_{ITRF} \\ Y_{ITRF} \\ Z_{ITRF} \end{Bmatrix} (t_c - 1989.0) \quad (5)$$

Wektor $(T_x, T_y, T_z)^T$ reprezentuje systematyczne przesunięcie początku układu (translacje). Druga część równania reprezentuje zmiany współrzędnych, wywołane ruchem płyty od epoki 1989.0 do epoki obserwacji t_c ; prędkości rotacji przyjmuje się z modelu NNR-NUVEL-1A, poprawione o różnice prędkości pomiędzy *ITRF* a NUVEL⁷. Parametry transformacji pomiędzy *ITRF* i *ETRF89* są publikowane przez komisję EUREF dla każdej kolejnej realizacji układu *ITRF* (tabl. 5).

⁷ Dane można znaleźć w IERS Annual Report.

Krok 3. Transformacja współrzędnych w *ETRF89* od epoki t_c do epoki 1989.0

Ostatnim krokiem jest przeprowadzenie współrzędnych do epoki 1989.0 przez wprowadzenie poprawki:

$$X_{ETRF}(1989.0) = X_{ETRF}(t_c) + V_{ETRF}(1989.0 - t_c) \quad (6)$$

Wektory prędkości dla poszczególnych stacji są niewielkie, z wyjątkiem Skandynawii, gdzie zmiany współrzędnych w *ETRF* są znaczące. Wykonane w ostatnich latach badania w rejonie Skandynawii szacują ruch pionowy na około 8 mm/rok. Dlatego wyłączając rejon Skandynawii, można przyjąć w przybliżeniu, że $V_{ETRF} = 0$.

Tablica 5. Wartości parametrów transformacji pomiędzy układami *ITRF_{yy}* i *ETRF*

<i>ITRF_{yy}</i>	T_x [cm]	T_y [cm]	T_z [cm]	$\dot{\omega}_x$ [mas/rok]	$\dot{\omega}_y$ [mas/rok]	$\dot{\omega}_z$ [mas/rok]
89	0	0	0	0.110	0.570	-0.710
90	1.9	2.8	-2.3	0.110	0.570	-0.710
91	2.1	2.5	-3.7	0.210	0.520	-0.680
92	3.8	4.0	-3.7	0.210	0.520	-0.680
93	1.9	5.3	-2.1	0.320	0.780	-0.670
94	4.1	4.1	-4.9	0.200	0.500	-0.650
96	4.1	4.1	-4.9	0.200	0.500	-0.650
97	4.1	4.1	-4.9	0.200	0.500	-0.650
00	5.4	5.1	-4.8	0.081	0.490	-0.792

Przykład transformacji

Obliczenie współrzędnych stacji JOZE (Józefosław) w układzie *ETRF89*. Obserwacje zostały wykonane w układzie *ITRF2000* w epoce 11 marca 2003. Po opracowaniu obserwacji uzyskano wektor geocentryczny stacji o składowych:

$$\begin{Bmatrix} X_{ITRF} \\ Y_{ITRF} \\ Z_{ITRF} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 3664940.2035 \\ 1409153.8388 \\ 5009571.3661 \end{Bmatrix}$$

$$t_c = 2003.19 \text{ (2003.03.11)}$$

Podstawiając powyższe wartości do równania (4), otrzymuje się współrzędne JOZE w *ETRF89* na epokę t_c :

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} X_{ETRF89} \\ Y_{ETRF89} \\ Z_{ETRF89} \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} X_{ITRF} \\ Y_{ITRF} \\ Z_{ITRF} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} +0.054 \\ +0.051 \\ -0.048 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 & 0.000792 & 0.000490 \\ -0.000792 & 0 & -0.000081 \\ -0.000490 & 0.000081 & 0 \end{Bmatrix} \times \\ &\quad \times \begin{Bmatrix} X_{ITRF} \\ Y_{ITRF} \\ Z_{ITRF} \end{Bmatrix} (t_c - 1989.0) \end{aligned}$$

Wykonując wskazane działania macierzowe, uzyskuje się współrzędne w *ETRF89* (epoka 1989.0), zakładając, że $V_{ETRF} = 0$:

$$\begin{Bmatrix} X_{ETRF} \\ Y_{ETRF} \\ Z_{ETRF} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 3664940.5042 \\ 1409153.6612 \\ 5009571.2019 \end{Bmatrix}$$

W tabelicy 6 zestawiono współrzędne w układzie *ETRF89* wszystkich stacji sieci WUT-EPN, które są opracowywane od 1996 roku w WUT Local Analysis Centre (Figurski 2002). Współrzędne te są odniesione do punktów referencyjnych anten (ARP) zainstalowanych na poszczególnych stacjach.

8. ZIEMSKIE UKŁADY ODNIESIENIA STOSOWANE W POLSCE

Ziemskie przestrzenne systemy odniesienia stosowane w Polsce można podzielić ze względu na technikę zastosowaną do wyznaczenia współrzędnych punktów definiujących związany z systemem układ odniesienia na: systemy zdefiniowane w epoce, w której pomiary wykonywano metodami tradycyjnymi i systemy zdefiniowane w okresie, gdy powszechne zastosowanie znalazły metody kosmiczne i satelitarne. Naturalną konsekwencją tego podziału jest zgodnie z rozważaniami zawartymi w rozdziale 2 niniejszej pracy podział na geocentryczne i niegeocentryczne układy odniesienia.

System odniesienia określony jest poprzez definicję orientacji w przestrzeni osi i położenia początku systemu, a także metrykę (skalę) (Kryński i Rogowski 2004). Przestrzenny system odniesienia może też opisywać elipsoidę odniesienia i odwzorowanie dające współrzędne płaskie stosowane w praktyce geodezyjnej.

Tablica 6. Współrzędne stacji permanentnych sieci WUT-EPN wyrażone w układzie *ETRF89*

Stacja	X [m]	Y [m]	Z [m]
BUCU 11401M001	4 093 761.2026	2 007 793.5699	4 445 129.7621
POLV 12336M001	3 411 557.7345	2 348 463.7961	4 834 396.7109
BOGI 12207M003	3 633 815.6743	1 397 453.9163	5 035 280.7891
SPT0 10425M001	3 328 984.8374	761 910.0793	5 369 033.5083
BOR1 12205M002	3 738 358.7791	1 148 173.5004	5 021 815.5838
WTZR 14201M010	4 075 580.8545	931 853.5686	4 801 567.9298
BOGO 12207M002	3 633 739.3044	1 397 433.9261	5 035 353.2778
METS 10503S011	2 892 571.1385	1 311 843.2825	5 512 633.9746
GOPE 11502M002	3 979 316.4313	1 050 312.2528	4 857 066.8898
WROC 12217M001	3 835 751.6117	1 177 249.7401	4 941 605.0413
GLSV 12356M001	3 512 889.3317	2 068 979.6785	4 888 903.0279
HOFN 10204M002	2 679 690.2016	-727 951.3763	5 722 789.1241
NYA1 10317M003	1 202 434.1606	252 632.2311	6 237 772.4819
JOEN 10512M001	2 564 139.4500	1 486 149.6219	5 628 951.2907
KIRU 10403M002	2 251 421.1289	862 817.0960	5 885 476.5590
VAR5 10322M002	1 844 607.6502	1 109 719.1089	5 983 936.0232
JOZE 12204M001	3 664 940.5030	1 409 153.6612	5 009 571.2015
KRAW 12218M001	3 856 936.1586	1 397 750.4691	4 867 719.4296
RIGA 12302M002	3 183 899.5505	1 421 478.3146	5 322 810.6311
KELY 43005M001	1 575 559.2940	-1 941 827.9865	5 848 076.3505
THU3 43001M002	538 093.7890	-1 389 088.0445	6 180 979.1558
LAMA 12209M001B	3 524 523.2582	1 329 693.4308	5 129 846.1597
MOPI 11507M001	4 053 738.2089	1 260 571.3787	4 744 940.6656
ONSA 10402M004	3 370 658.8497	711 876.9515	5 349 786.7737
VLNS 10801M001	3 343 600.9744	1 580 417.5526	5 179 337.1200
PENC 11206M006	4 052 449.8082	1 417 680.8993	4 701 406.9126
TRAB 20808M001	3 705 250.7755	3 084 421.4860	4 162 044.5915
SULP 12366M001	3 765 297.3429	1 677 558.9936	4 851 297.2195
UZHL 12301M001	3 907 587.7914	1 602 428.4715	4 763 783.5599
MIKL 12335M001	3 698 554.3670	2 308 675.7981	4 639 769.3115
ESCO 13435M001	4 696 265.1645	79 978.2306	4 304 244.7445
LLIV 13436M001	4 709 586.4976	162 244.3480	4 285 914.0299

9.1. Ziemskie układy odniesienia wyznaczone za pomocą klasycznych technik pomiarowych

Powstanie zjednoczonej Polski po rozbiorach spowodowało konieczność wprowadzenia jednolitego układu współrzędnych dla istniejących w trzech zaborach sieci geodezyjnych i map topograficznych. Zadanie to zrealizował Wojskowy Instytut Geograficzny (WIG) wprowadzając **układ odniesienia „Borowa Góra”** („BG”).

Układ odniesienia „Borowa Góra”

Układ „BG”, oficjalnie wprowadzony do użytku w 1936 roku, stanowił podstawę prowadzenia prac geodezyjnych i kartograficznych do 1952 r. (Cisak i Sas 2004). Powstał on w wyniku przyłożenia elipsoidy Bessela 1841 ($a = 6\,377\,395$ m, $f = 1/299.152\,813$) do geoidy w Borowej Górze. Orientację zapewniał azymut astronomiczny na wieżę w Modlinie. Jako współrzędne geodezyjne tego punktu przyjęto wyznaczone z pomiarów astronomicznych:

$$\varphi = 52^{\circ}28'32''.85 \quad \lambda = 21^{\circ}02'12''.12$$

Punkt przyłożenia tego układu znajduje się obecnie na terenie Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznego Instytutu Geodezji i Kartografii w Borowej Górze. Jest on przykryty kopcem o wysokości około 8 m. Punkt ten, pomimo historycznego znaczenia, posiada wyznaczone współrzędne geodezyjne w układzie „1965” oraz *ITRF*.

Współrzędne płaskie punktów sieci geodezyjnej zostały obliczone w odwzorowaniu Roussilhe’a zmodyfikowanym dla terenu Polski przez profesora Grabowskiego z Politechniki Lwowskiej. Odwzorowanie to nazwano odwzorowaniem quasi-stereograficznym⁸ Wojskowego Instytutu Geograficznego. Oficerowie WIG Biernacki i Słomczyński w 1930 r. zastosowali je do opracowania map i współrzędnych punktów triangulacyjnych leżących na obszarze Polski. Punkt główny odwzorowania quasi-stereograficznego WIG obrano w punkcie o współrzędnych: $\varphi = 52^{\circ}\text{N}$, $\lambda = 22^{\circ}\text{E}$ (Greenwich). W celu zminimalizowania zniekształceń na odwzorowywanym obszarze przyjęto współczynnik zniekształcenia skali $m_0 = 0.9995$, co daje zerowe zniekształcenia na elipsie zbliżonej do koła o promieniu około 284 km.

⁸ Odwzorowanie quasi-stereograficzne jest odwzorowaniem azymutalnym wiernokątnym powierzchni elipsoidy (analogia do odwzorowania stereograficznego powierzchni kuli). Orientacja przestrzenna realizowana jest przez podanie tzw. punktu głównego, który jest punktem styczności z elipsoidą odniesienia płaszczyzny równoległej do płaszczyzny odwzorowawczej. Rozkład zniekształceń liniowych na płaszczyźnie odwzorowawczej, odwzorowania quasi-stereograficznego definiuje się przez podanie współczynnika zniekształcenia skali w punkcie głównym.

Wszystkie mapy wydawane w okresie międzywojennym przez WIG, a także przez niemiecki Sztab Generalny w czasie II wojny światowej (reprinty map polskich), zawierały nadruk siatki współrzędnych w układzie „Borowa Góra”.

Po II wojnie światowej w wyniku zmian terytorialnych kraju do jego części pokrytej przedwojenną osnową geodezyjną dołączona została część pokryta triangulacją niemiecką. Powstała w ten sposób osnowa geodezyjna była niejednorodna (różne elipsoidy odniesienia, różne punkty przyłożenia, różne wyrównania). Na bazie tej osnowy, bez przeprowadzenia ścisłego wyrównania, obliczono współrzędne geodezyjne punktów w odniesieniu do elipsoidy Bessela 1841 przyłożonej w Borowej Bórze. Współrzędne płaskie w układzie „BG” w odwzorowaniu Gaussa–Krügera zostały obliczone w sześciostopniowych pasach odwzorowawczych. Początkowo przyjęto współczynnik zniekształcenia skali na południku osiowym $m_0 = 0.999\ 935$, a od 1949 r. $m_0 = 1$ (Różycki 1950). Dokładność wyznaczenia współrzędnych w tym układzie wynosi około 0.1 m (Cisak i Sas 2004). Terytorium Polski podzielono na dwie zasadnicze strefy odwzorowawcze: na wschód i na zachód od południka 18° (południki osiowe: 15° i 21°).

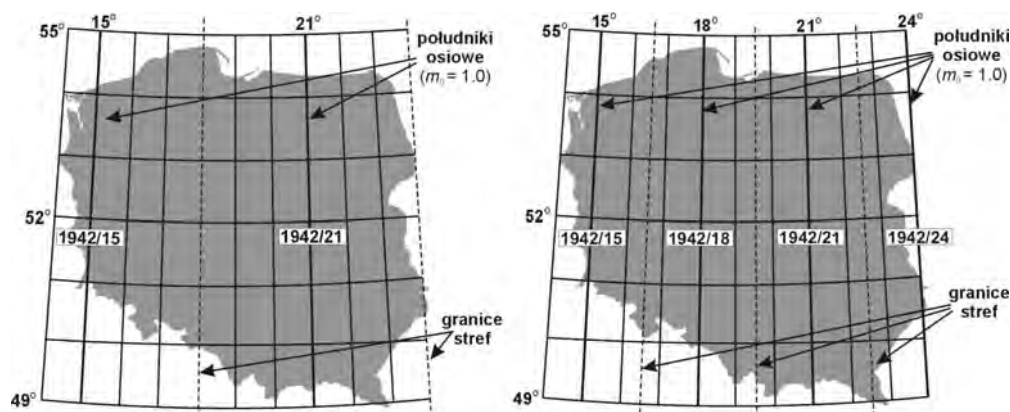
Układ odniesienia „1942”

W roku 1953, w wyniku unifikacji układów odniesienia państw należących do Układu Warszawskiego, wprowadzono w Polsce układ odniesienia Pułkowo 1942. Układ ten obowiązywał dla celów gospodarczych do połowy lat sześćdziesiątych, a dla celów obronnych do początku lat dziewięćdziesiątych. Układ odniesienia Pułkowo 1942 powstał poprzez przyłożenie elipsoidy Krasowskiego ($a = 6\ 378\ 245.000\ 00$ m, $f = 1/298.300\ 000$) do geoidy w Pułkowie ($\varphi = 59^\circ 46' 18''.55$, $\lambda = 30^\circ 19' 42''.0$) z orientacją na punkt Bugary (Różycki 1950). Był to układ odniesienia przyjęty w byłym ZSRR w roku 1942 – stąd też jego nazwa.

Z układem odniesienia „1942” związane są dwa sposoby odwzorowania Gaussa–Krügera (Kadaj 1999a):

- 1) Dla map średnio- i małoskalowych (dla skal mniejszych od 1:5000) – odwzorowanie w pasach południkowych o szerokości 6° , w wyniku czego na obszarze Polski powstały dwie strefy odwzorowawcze: z południkami osiowymi 15° i 21° , oznaczane również jako 1942/15 (6) i 1942/21 (6). Zniekształcenia odwzorowawcze zmieniały się od 0 na południku osiowym każdej strefy do około 59 cm/km na brzegach strefy.
- 2) Dla map wielkoskalowych (skale większe od 1:5000) stosowano odwzorowanie w pasach południkowych o szerokości 3° , w wyniku czego obszar Polski został podzielony na cztery strefy odwzorowawcze z południkami osiowymi 15° , 18° , 21° i 24° , oznaczane również jako

1942/15 (3), 1942/18 (3), 1942/21 (3), 1942/24 (3). Zniekształcenia odwzorowawcze na brzegach stref dochodziły do 15 cm/km.

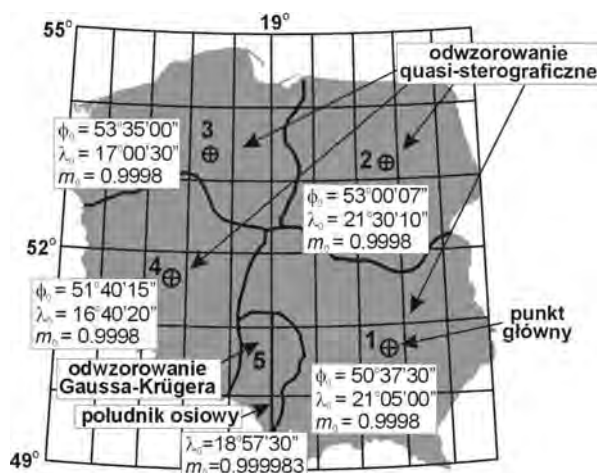


Rys. 1. Układ „1942” w pasach 6 i 3 stopniowych (Kadaj 1999a)

Układ współrzędnych „1965”

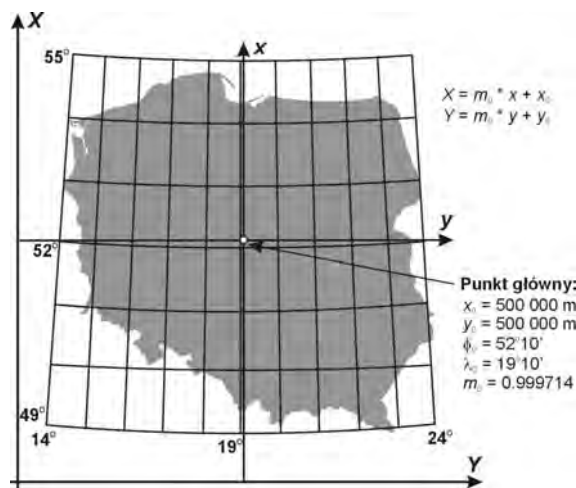
Układ odniesienia „1942” był układem objętym klauzulą tajności. Stosowanie tego układu w pracach cywilnych było w związku z tym bardzo kłopotliwe, dlatego też w latach sześćdziesiątych państwowa służba geodezyjna rozpoczęła prace nad wprowadzeniem nowego, 5-strefowego układu odwzorowawczego, który nazwany został układem „1965”. Układ współrzędnych (płaskich) „1965” wprowadzony został do opracowań kartograficznych przeznaczonych na potrzeby gospodarcze w 1968 r. Decyzja Prezydium Rządu z 1970 r. zobowiązywała do wymiany map wykonanych uprzednio w innych odwzorowaniach i układach odniesienia (np. mapy topograficzne w skali 1:10 000 do roku 1970 opracowywane były w układzie odniesienia „1942”) na mapy w układzie „1965” oraz wykonanie dla całego kraju prac kartograficznych umożliwiających udostępnienie map użytkownikom. Zgodnie z rozporządzeniem Prezesa Rady Ministrów z dnia 8 sierpnia 2000 r. w sprawie państwowego systemu odniesień przestrzennych, układ „1965” oraz lokalne układy współrzędnych mogą być stosowane do dnia 31 grudnia 2009 r. Podstawę układu „1965” stanowił ten sam, co w systemie „1942” układ współrzędnych elipsoidalnych. Obszar Polski podzielono na 5 stref odwzorowawczych, przy czym w strefach 1, 2, 3, 4 zastosowano tzw. odwzorowanie quasi-stereograficzne Roussilhe’a, natomiast w strefie 5 zmodyfikowane odwzorowanie Gaussa–Krügera (Kadaj 1999a). Strefy odwzorowawcze w układzie „1965” przedstawione są na mapie (rys. 2) (GUGiK 2000a).

Zniekształcenia odwzorowawcze w każdej strefie układu mieszczą się w zakresie od 20 cm/km do –20 cm/km. Układ „1965” był przeznaczony głównie do tworzenia mapy zasadniczej.



Rys. 2. Podział obszaru Polski na strefy układu „1965” (Kadaj 1999a)

Dla map topograficznych i przeglądowych w skalach 1:100 000 i mniejszych przyjęto układ oparty na jednostrefowym odwzorowaniu quasi-stereograficznym obszaru Polski, nazwany „GUGiK80”. Punkt główny odwzorowania był umiejscowiony w geometrycznym „środku” Polski ($\varphi_0 = 52^\circ 10'$, $\lambda_0 = 19^\circ 10'$). Współczynnik zniekształcenia skali w tym punkcie wynosi $m_0 = 0.999\ 714$, a maksymalne zniekształcenie liniowe na granicach Polski wynosi 93 cm/km. Układ ten znalazł zastosowanie jedynie przy opracowaniu wydawanej w latach 1980–1984 topograficznej mapy Polski w skali 1:100 000.



Rys. 3. Układ współrzędnych „GUGiK80” (odwzorowanie quasi-stereograficzne) (Kadaj 1999a)

9.2. Ziemskie układy odniesienia wyznaczone za pomocą satelitarnych i kosmicznych technik pomiarowych

W końcu lat dziewięćdziesiątych powstała techniczna możliwość modernizacji państwowego systemu odniesień przestrzennych poprzez wykorzystanie obserwacji satelitarnych. Wyrazem tego był udział w kampaniach WEDOC stacji położonych w Polsce oraz założenie Krajowej Sieci Dopplerowskiej (Śledziński i in. 1988). Prace te kontynuowano na początku lat dziewięćdziesiątych pod kątem włączenia polskich punktów do sieci stacji europejskich definiujących ETRS, wiążący te punkty ze międzynarodowego ziemskiego systemu odniesienia ITRS. Na wniosek Głównego Geodety Kraju, dr. Remigiusza Piotrowskiego, powołany został przez Sekcję Sieci Geodezyjnych Komitetu Geodezji PAN zespół pod przewodnictwem prof. Lubomira W. Barana, który opracował raport „O potrzebie i zasadach założenia zintegrowanej podstawowej sieci geodezyjnej w układzie EUREF” (Baran i in. 1991). Zaproponowano sieć składającą się z 11 punktów, przy których dobrze, poza warunkami geometrycznymi obowiązującymi dla sieci EUREF, uwzględniono również ich przynależność do istniejących lub projektowanych sieci:

- Krajowej Sieci Dopplerowskiej (KSD), założonej w 1986 roku,
- Jednolitej Sieci Astronomiczno-Geodezyjnej (JSAG),
- International GPS Service for Geodynamics (IGS),
- Baltic Sea Level Project (BSLP),
- realizowanych od szeregu lat krajowych sieci geodynamicznych.

Po konsultacjach w środowisku geodezyjnym raport został zaakceptowany jako projekt nowej osnowy EUREF w Polsce, która miałaby stanowić również sieć „zerowego” rzędu, realizującą nowy układ odniesienia. Nowe punkty, ze względu na jawność ich współrzędnych, nie pokrywały się z istniejącą osnową państwową. Uznano natomiast za wskazane, tam gdzie było to możliwe, wykonanie stabilizacji nad płytami punktów sieci KSD. Stabilizację wykonano w postaci postumentu betonowego o wysokości około 100 cm nad poziomem gruntu z wymuszonym centrowaniem.

W roku 1992 utworzono na obszarze Polski najpierw sieć EUREF-POL, złożoną z 11 punktów bazowych, którą następnie zagęszczono siecią około 350 punktów, zwaną w skrócie POLREF. Współrzędne punktów sieci EUREF-POL i sieci EUREF zostały wyznaczone przy użyciu obserwacji GPS. Sieci EUREF-POL i POLREF stały się z kolei podstawą ponownego wyrównania dawnej sieci astronomiczno-geodezyjnej i triangulacji wypełniającej (sieci I klasy), a następnie także sieci poziomej II klasy. Wszystkie obliczenia wykonano już na nowej elipsoidzie GRS80 systemu *ETRS*. Zdefiniowany w ten sposób układ odniesienia stanowi podstawę wprowadzenia nowych układów współrzędnych płaskich: „1992”, „2000” (Baran i in. 1993).

Równoległe z pracami cywilnej służby geodezyjnej nad zmianą układu odniesienia trwały prace służb wojskowych, które zobowiązane były do dostosowania polskich norm do standardów NATO. Pierwszą decyzją służącą realizacji tych zadań było zaprojektowanie i pomiar sieci WPSG (56 punktów). Pomiar sieci został wykonany przy współudziale wojskowej służby topograficznej Stanów Zjednoczonych. Następnie w trzech kolejnych kampaniach sieć tę zagęszczono siecią WSSG o liczbie około 600 punktów, jednorodnie rozmieszczonych na terenie Polski. Sieci WSSG i POLREF zostały wyrównane niezależnie, niestety, przyjęto również skrajnie różne strategie opracowania i nawiązania wspomnianych sieci. Sieć WSSG została nawiązana do istniejącego w Europie systemu stacji permanentnych EUREF, a sieć POLREF do punktów sieci EUREF-POL. W ten sposób różnice na punktach wspólnych sieci dochodziły nawet do 10 cm. W 1999 r. na podstawie porozumienia podpisanego przez Głównego Geodetę Kraju i Szefa Wojskowej Służby Topograficznej wydano decyzję o wspólnym wyrównaniu sieci POLREF i WSSG. Wspólne wyrównanie sieci nie było jednak możliwe bez powtórnego przeliczenia całej sieci POLREF. Powodem tego było niezarchiwizowanie równań normalnych z pierwotnego wyrównania. Powtórnego wyrównania nie brano pod uwagę, dlatego postanowiono, aby wpasować układ realizowany przez sieć WSSG w sieć POLREF, za pomocą transformacji Helmerta, wykorzystując do tego celu 26 punktów wspólnych. Zdefiniowany w ten sposób układ odniesienia stanowi podstawę wprowadzonego na terenie Polski dla celów wojskowych układu współrzędnych płaskich „UTM”.

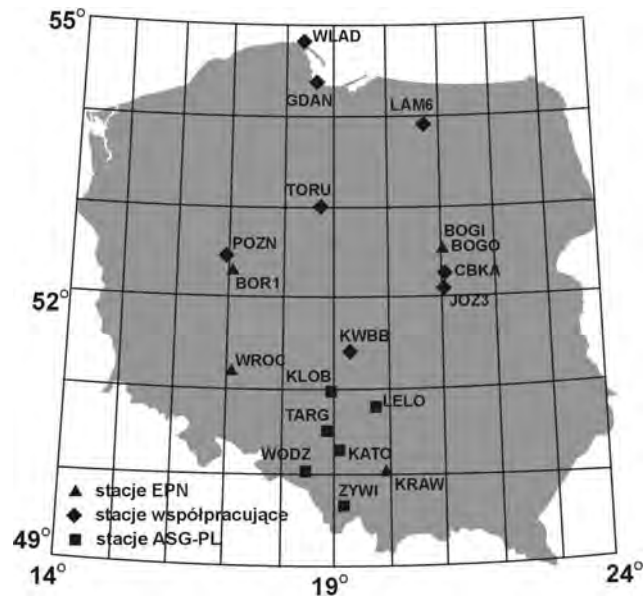
Pomimo wykorzystania techniki satelitarnej GPS, założona techniką GPS (POLREF) osnowa podstawowa kraju, podobnie jak zakładane technikami „klasycznymi”, ma charakter statyczny, nie ma możliwości kontroli zmian współrzędnych punktów w funkcji czasu. Problem częściowo pozwoliły rozwiązać powstające w Polsce stacje permanentne GNSS, na których prowadzone są w ramach programów międzynarodowych (IGS/EUREF) ciągle pozycyjne obserwacje satelitarne służące do dowiązania wyników obserwacji wykonywanych w aktualnym globalnym systemie odniesienia do państwowego systemu odniesień przestrzennych. Na terenie Polski w pierwszej połowie lat dziewięćdziesiątych powstały chronologicznie trzy stacje IGS: w Józefosławiu, Borowcu i Lamkówku.

Obecnie działa w Polsce, w ramach sieci IGS/EUREF, 8 stacji permanentnych GPS (rys. 4). Oprócz wymienionych wyżej trzech stacji IGS do podsieci IGS – EPN włączonych jest 5 polskich stacji: Borowa Góra, Wrocław, Kraków, Katowice i Żywiec, służących do monitorowania europejskiego układu odniesienia *ETRF*. Na niektórych ze wspomnianych stacji utrzymywane są również inne służby permanentne, takie jak: laser satelitarny – SLR, grawimetryczna służba pływowa, służba czasu, pomiary astrometryczne, meteorologiczne, służba stanu jonosfery i troposfery. Sieć stacji permanentnych GPS działających w Polsce wzbogacona jest siecią stacji Polskiej Aktywnej Sieci Geodezyjnej (ASG PL), powołanej na podstawie porozumie-

nia pomiędzy Głównym Geodetą Kraju a Marszałkiem Województwa Śląskiego. Sieć stacji permanentnych GPS współpracujących z ASG PL przedstawiono na rysunku 5 (<http://www.asg-pl.pl/>).



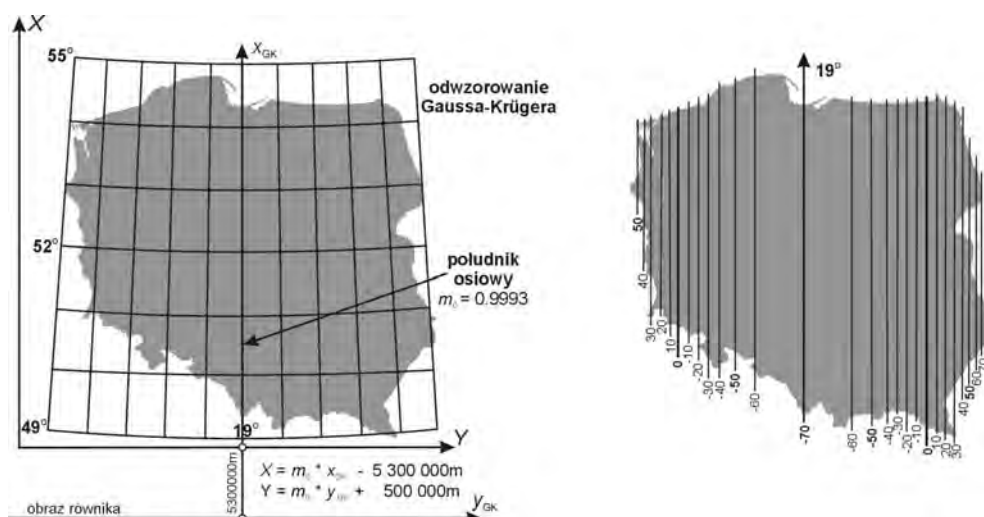
Rys. 4. Sieć stacji permanentnych EUREF/IGS w Polsce



Rys. 5. Sieć stacji permanentnych GPS współpracujących z ASG PL

Układ współrzędnych „1992”

Państwowy układ płaskich współrzędnych prostokątnych, stanowiący część państwowego systemu odniesień przestrzennych, wprowadzony został, podobnie jak opisany dalej układ „2000”, rozporządzeniem Rady Ministrów z 8 sierpnia 2000 r. Układ „1992” jest jednostrefowym, dla obszaru Polski, odwzorowaniem Gaussa–Krügera z południkiem osiowym $\lambda_0 = 19^\circ$ i współczynnikiem zmiany skali $m_0 = 0.9993$ (Balcerzak 1994). To ostatnie założenie ma na celu uzyskanie równomiernego rozkładu zniekształceń liniowych, od -70 cm/km na południku osiowym do około 90 cm/km w skrajnych, wschodnich obszarach Polski (rys. 6) (Balcerzak 1995). Układ został nazwany układem „1992”. Obecnie stanowi podstawę wykonywania nowych map w skalach 1:10 000 i mniejszych. Ze względu na znaczne zniekształcenia liniowe układ ten nie został rekomendowany do wielkoskalowych opracowań kartograficznych.

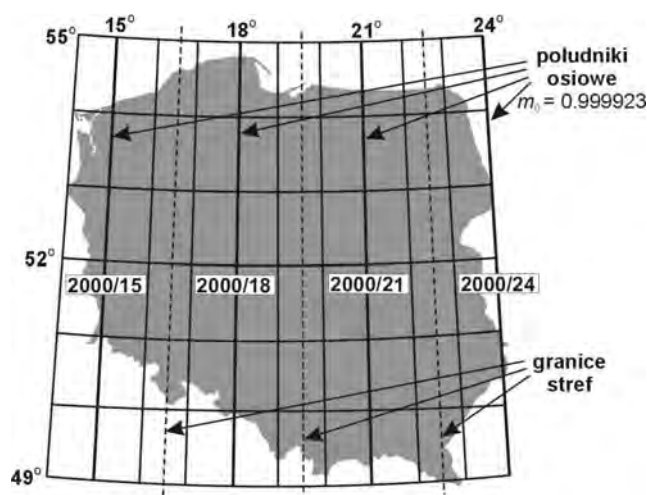


Rys. 6. Układ „1992” (jednostrefowe odwzorowanie Gaussa–Krügera).
Rysunek prawy prezentuje rozkład zniekształceń odwzorowawczych [cm]
(Kadaż 1999a)

Układ współrzędnych „2000”

Układ „2000” jest czterostrefowym odwzorowaniem Gaussa–Krügera elipsoidy GRS80, w pasach 3-stopniowych. Dla obszaru Polski wyodrębniono cztery trzystopniowe strefy południkowe o południkach osiowych, których długości geodezyjne wschodnie wynoszą 15° , 18° , 21° i 24° . Dla każdej z tych stref współczynnik m_0 zniekształcenia skali na południku osiowym wynosi $0.999\ 923$, a zniekształcenia liniowe zawierają się w zakresie od

−7.7 cm/km na południku osiowym do około +7 cm/km na brzegu każdej strefy (GUGiK 2000a, 2000b).



Rys. 7. Układ „2000” (wielostrefowe odwzorowanie Gaussa–Krügera) (Kadaj 1999c)

Układ współrzędnych „UTM”

Poprzeczne odwzorowanie Mercatora (Transverse Mercator Projection, TM) znane również pod nazwą wiernokątnego odwzorowania Gaussa lub odwzorowania Gaussa–Krügera (van Gysen 1992), jest walcowym, poprzecznym, stycznym (tj. współczynnik zniekształcenia skali na południku osiowym $m_0 = 1$), wiernokątnym odwzorowaniem elipsoidy. Do typowych wymiarów pasów odwzorowawczych używanych w odwzorowaniu TM zalicza się pasy 2°, 3°, 4° i 6°. Modyfikacją odwzorowania TM jest uniwersalne poprzeczne odwzorowanie Mercatora (Universal Transverse Mercator Projection, UTM) stosowane na świecie do celów wojskowych i nawigacyjnych od II wojny światowej. Odwzorowanie to jest używane przez wszystkie państwa członkowskie NATO. Walec eliptyczny, na którego powierzchnię odwzorowywany jest obraz powierzchni elipsoidy, nie jest w wypadku „UTM” styczny do elipsoidy wzdłuż południka osiowego pasa odwzorowawczego; przecina on elipsoidę w taki sposób, że wzdłuż południka osiowego powstaje stałe zniekształcenie skali $m_0 = 0.9996$, co odpowiada zniekształceniu liniowemu na południku osiowym −40 cm/km. „UTM” należy zatem do grupy odwzorowań siecznych elipsoidy. W „UTM” stosowane są wyłącznie sześciostopniowe pasy odwzorowawcze, którym przypisane są numery wzrastające z zachodu na wschód od 1 do 60, przy czym pas odwzorowawczy o numerze 1 odpowiada

strefie odwzorowawczej pomiędzy południkami 180° i 186° (Snyder 1987). Obszar Polski odwzorowuje się w pasach o numerach 33 i 34. Odwzorowanie „UTM” zostało wprowadzone pierwotnie na elipsoidzie Hayforda, obecnie zaś w zastosowaniach cywilnych i wojskowych obowiązuje elipsoida WGS84. W Polsce odwzorowanie TM przyjęło się, że nazywać odwzorowaniem Gaussa–Krügera. Sieczne, z wyspecyfikowanym współczynnikiem zniekształcenia skali $m_0 \neq 1$, walcowe, poprzeczne, wiernokątne odwzorowanie elipsoidy nazywane jest w Polsce również odwzorowaniem Gaussa–Krügera lub „zmodyfikowanym odwzorowaniem Gaussa–Krügera”.

Transformacja współrzędnych pomiędzy układem ETRF89 i układem „1942”

Siedmioparametrową transformację pomiędzy współrzędnymi kartezjańskimi w układach ETRF89 i „1942” można zrealizować, stosując podane niżej wzory (Kadaż 1999a):

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}_{1942} = (1+s) \begin{bmatrix} 1 & e_z & -e_y \\ -e_z & 1 & e_x \\ e_y & -e_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{ETRF89} + \begin{bmatrix} dX \\ dY \\ dZ \end{bmatrix} \quad (7)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} dX &= -33.429\ 70 \text{ m}, & dY &= 146.574\ 76 \text{ m}, & dZ &= 76.286\ 90 \text{ m}, \\ s &= 0.847\ 52 \text{ ppm}, \\ e_x &= -0.358\ 672/\rho'', & e_y &= -0.052\ 836/\rho'', & e_z &= 0.843\ 544/\rho''. \end{aligned}$$

Wykonanie powyższej transformacji daje w wyniku współrzędne geocentryczne odniesione do początku układu „1942”. Transformacja do układu „1965” jest bardziej skomplikowana; jej opis został zamieszczony w instrukcji G-2 (GUGiK 2000b).

9. PODSUMOWANIE

Historia ziemskiego systemu odniesienia liczy już ponad 100 lat (1900–2004). W tym okresie nastąpił ogromny wzrost dokładności ziemskiego układu odniesienia (od ± 0.5 m do ± 0.003 m). Nastąpił też istotny wzrost dokładności transformacji pomiędzy niebieskim i ziemskim układem odniesienia (obecnie *ICRF* i *ITRF*). Wzrost dokładności tej transformacji wynika z wprowadzania coraz dokładniejszych modeli precesji i nutacji oraz poprawy dokładności wyznaczeń parametrów ruchu obrotowego Ziemi (EOP). W tym czasie poprawiła się w istotny sposób dokładność modeli deformacji. Nowe systemy odniesienia wraz z dokładnie określonymi wzajemnymi relacjami stwarzają możliwość pełnego wykorzystania globalnych systemów satelitarnych i technik kosmicznych, zarówno do dalszych badań dynamiki Ziemi jako

planety, jak i rozwiązywania praktycznych zadań z zakresu nawigacji oraz geodezji.

PODZIĘKOWANIA

Niniejszą pracę wykonano w ramach badań statutowych Instytutu Geodezji Wyższej i Astronomii Geodezyjnej Politechniki Warszawskiej. Autorzy opracowania dziękują panu prof. dr. hab. Janowi Kryńskiemu za wiele cennych uwag merytorycznych i pomoc przy redagowaniu pracy oraz kolegom mgr inż. Magdalenie Kłęk i mgr. inż. Wiesławowi Kurce z Zespołu Astronomii Geodezyjnej za pomoc przy jej opracowaniu.

BIBLIOGRAFIA

- Balcerzak J., 1994, *Odwzorowanie Gaussa-Krügera w szerokiej 12° strefie dla obszaru Polski*, IX Szkoła Kartograficzna, Komorowo, 10–14 października 1994.
- Barcerzak J., 1995, *Państwowy układ współrzędnych 1992*, Główny Geodeta Kraju (mat. do użytku służbowego), Warszawa.
- Balcerzak J., 1997, *Projective reductions in the Roussilhe projection*, Geodezja i Kartografia, t. XLVI, z. 4, 1997, pp. 254–261.
- Baran L.W., Śledziński J., Barlik M., Czarnecki K., Dobrzycka M., Gajderowicz I., Oszczak S., Pachelski W., Rogowski J.B., Cisak J., 1991, *Raport o potrzebie i zasadach założenia zintegrowanej podstawowej sieci geodezyjnej Polski w układzie EUREF*, Raport dla Głównego Geodety Kraju, Warszawa.
- Baran L.W., Barlik M., Czarnecki K., Gelo S., Krajewski W., Nowak E., Oszczak S., Pachelski W., Rogowski J.B., Sas-Uhrynowski A., Śledziński J., Tryśła A., Zieliński J.B., Grygorenko W., Makowski A., Panaśkiuk J., Balcerzak J., 1993, *Ekspertyza dotycząca podstawowych założeń nowego państwowego systemu współrzędnych geodezyjnych w Polsce*, Raport dla Głównego Geodety Kraju, Warszawa.
- Bosy B., Figurski M., 2003, *Problematyka opracowania obserwacji satelitarnej GPS w precyzyjnych sieciach lokalnych*, Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Wrocław.
- Boucher C., Altamimi Z., 2001, *Memo: Specifications for Reference Frame Fixing in the Analysis of a EUREF GPS Campaign*, (<http://www.epncb.oma.be/papers.html>).
- Cisak M., Sas A., 2004, *Transformacja współrzędnych punktów z układu „Borowa Góra” do układu „1942”*, Prace IGIK, Warszawa (w druku).
- Dadlez R., Jaroszewski W., 1994, *Tektonika*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

- DMA, 1991, *Department of Defense World Geodetic System 1984. Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*, U. S. Defense Mapping Agency DMA TR 8350.2, Second Edition, 1 September 1991.
- EUROCONTROL, 1995, *WGS84 Implementation Training Course*, Brussels, Belgium, held at INSTILUX/Luxembourg on 31.1-3.2 1995, prepared by the Institute of Geodesy and Navigation, University FAF Munich, Germany.
- Figurski M., 2002, *Propozycje standaryzacji opracowania precyzyjnych sieci GPS*, Seminarium „Satelitarne metody wyznaczania pozycji we współczesnej Geodezji i Nawigacji”, 16–17 września 2002, Warszawa–Józefosław.
- GEONET, 1997, *GEONET_unitrans: uniwersalny program transformacji współrzędnych pomiędzy różnymi układami w obszarze Polski oraz programy pomocnicze, opis pakietu*, I wyd., 1977, n. ed. 2000, ALGORES-SOFT s.c. Rzeszów.
- Gordon R.G., Stein S., de Mets Ch., Argus D.F., 1987, *Statistical Test for Closure of Plate Motion Circuits*, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 14, No 6, pp. 587–590.
- GUGIK, 2000a, *Wytyczne Techniczne G-1.10* (nowa edycja), Załącznik na CD-R: Program TRANSPOL, Główny Geodeta Kraju, GUGiK, Warszawa.
- GUGIK, 2000b, *Instrukcja Techniczna G-2* (nowe wydanie), GUGIK, Warszawa.
- van Gysen H., 1992, *Coordinate systems and map projections for GIS*, Presented at the GIS conference in Pretoria, South Africa, April.
- Heiskanen W.A., Moritz H., 1966, *Physical Geodesy*, Freeman and Company, San Francisco–London.
- Hofmann-Wellenhopf B., Lichtenegger H., Collins J., 1997, *Global Positioning System Theory and Practice*, Springer-Verlag, Wien-New York.
- IERS, 1993, *IERS-1992*, Annual Report, International Earth Rotation Service (IERS), Observatoire de Paris, July.
- IERS96, 2000, *The 1996 IERS Conventions Homepage: the Chapters, Subroutines, and Associated Information*, <http://maia.usno.navy.mil/conventions.html>.
- Kadaj R., 1999a, *Formuły odwzorowawcze i parametry układów współrzędnych*, Wytyczne Techniczne G-1.10, GUGiK, Warszawa, grudzień.
- Kadaj R., 1999b, *Procedury transformacji pomiędzy państwowymi układami współrzędnych*, Opis procedur bazy GEOS w CODGiK, GEOMAT sp. z o.o. w Poznaniu, wrzesień.
- Kadaj R., 1999c, *Układ Kartograficzny PUK2000 (projekt wdrożeniowy)*, INFOPRO s.a. Przedsiębiorstwo Projektowo-Wdrożeniowe, Warszawa, sierpień.

- Kryński J., Rogowski J.B., 2004, *Systemy i układy odniesienia w geodezji, geodynamice i astronomii*, Monographic series of the Institute of Geodesy and Cartography, Nr 10, Warsaw 2004, pp. 11–35 (this issue).
- Melbourne W., Anderle R., Feissel M. i inni, 1983, *Project MERIT Standards*, USNO Circular No 167, Washington D.C.
- de Mets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S., 1990, *Current plate motion*, *Geophys. J. Int.*, 101, pp. 425–478.
- de Mets C. i inni, 1994, *Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions*, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 21 No 20, pp. 2191-2194.
- Mueller I.I., 1969, *Spherical and Practical Astronomy as Applied to Geodesy*, Frederick Ungar Publishing Co., New York.
- Różycki J., 1950, *Odwzorowanie Gaussa – Krügera i jego zastosowania w Polsce*, Wyd. 2 zmienione, Prace GINB, Warszawa 1950.
- Sandwell D.T., 2001, *Geodynamics: Marine Magnetic Anomalies*, Lecture Notes SIO 234, <http://topex.ucsd.edu/geodynamics>
- Seeger H., 1993, *EUREF – A modern Geodetic Approach to Establish an All-European Reference System*, Belgo-European Seminar “New Surveyors”, Wegimont, 24–25 March.
- Snyder J.P., 1987, *Map projections – a working Manual*, U.S. Geological Survey Professional Paper 1395, U.S. Government Printing Office, Washington.
- Śledziński J., Rogowski J.B., Jakś W., 1988, *Krajowa Sieć Dopplerowska*, Materiały IV Sympozjum Komitetu Geodezji PAN „Współczesne problemy podstawowych sieci geodezyjnych”, Warszawa, pp. 133–142.

JERZY B. ROGOWSKI

MARIUSZ FIGURSKI

Institute of Geodesy and Geodetic Astronomy

Warsaw University of Technology

TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEMS AND REFERENCE FRAMES AND THEIR REALIZATIONS

S u m m a r y

Terrestrial reference system is the basis for processing observations not only in the framework of geodesy but also in a wide range of Earth's sciences. Terrestrial reference frame was up to 1988 represented by a conventional reference frame with a primary axis pointing the conventional pole that was determined using time varying due to polar motion – coordinates of the pole, and with the conventional zero-meridian corresponding to the zero-meridian of mean observatory of the International Time Service network of stations. The instantaneous pole as well as time required to determine astronomical longitude were obtained using astrometric observations. Historical review of polar motion determination by ILS, IPMS and BIH is presented in the paper. Since 1988 the coordinates of „instantaneous” pole together with observation station coordinates and their rates are being determined at the high precision level using satellite observations and VLBI technique. Recent realizations of terrestrial reference systems and the role of IERS in their establishment and maintenance are discussed in the paper. Transformations between the realizations of *ITRF*, from *ITRF88* until *ITRF2000* with the emphasis on practical aspects are presented. Global models NUVEL1, NUVEL1A and NNR-NUVEL-1A of tectonic motion are introduced. *ETRF89* and its relation to *ITRF* and WGS84 are presented. The geodetic reference frames and coordinate systems used in Poland during last 80 years are described. The examples of transformation between *ETRF* and *ITRF2000* are given.